

## **Calentamiento global: ¿Efecto invernadero o actividad solar?.**

Pablo J.D. Mauas

*IAFE, Buenos Aires, Argentina, pablo@iafe.uba.ar*

**Abstract.** Here we discuss some evidences suggesting that solar activity affects the terrestrial climate. We pay particular attention to claims, made by different authors, that global warming is due to an increase in solar activity and not to anthropogenic causes like, mainly, the greenhouse effect. We conclude that, although there are evidences suggesting that solar activity affects the climate at Earth, it seems doubtful that this is the main cause of global warming.

**Resumen.** En este trabajo se discuten algunas evidencias que sugieren una influencia de la actividad solar en el clima terrestre. Se presta particular atención a la sugerencia, hecha por distintos autores, de que el calentamiento global estaría relacionado con un incremento en esta actividad y no con efectos de origen humano como, principalmente, el efecto invernadero. Concluimos que, aunque existen evidencias de la influencia que la cambiante actividad solar tiene sobre el clima terrestre, parece dudoso que esta sea la causa principal del calentamiento global.

### **1. Introducción.**

En las últimas décadas, el estudio de los fenómenos conocidos globalmente como “Actividad Solar” recibió un gran impulso debido a la relación propuesta entre esta actividad y el clima terrestre, que según algunos autores explicaría el llamado calentamiento global.

Por ejemplo, el 4 de diciembre de 1997 apareció en el Wall Street Journal un artículo titulado “Science Has Spoken: Global Warming Is a Myth” (ver Figura 1). Este artículo, junto con una copia de un artículo científico nunca publicado (Robinson et al 1998), fue enviado masivamente a científicos norteamericanos, acompañado de un petitorio a ser entregado al Congreso de los Estados Unidos oponiéndose a la ratificación del tratado de Kyoto.

Los astrónomos, habituados a investigar sin ningún tipo de presión, en temas no conflictivos y cuya aplicación práctica e implicancia socioeconómica se halla, como mínimo, varias décadas en el futuro, nos encontramos en este caso frente a un tema candente y de enorme importancia política.

En este trabajo no discutiremos el calentamiento global, sino que nos concentraremos en cuál es la evidencia de una influencia de la actividad solar en el clima terrestre, y cuáles serían los mecanismos que explicarían esta influencia. Trataremos de mostrar ambos puntos de vista en el debate, desde quienes opinan que todo el calentamiento global es debido a un aumento de la actividad solar hasta quienes opinan que este aumento no tiene influencia en el clima terrestre. También presentaremos un resumen de los argumentos más relevantes publicados en la literatura científica a favor y en contra de cada teoría.

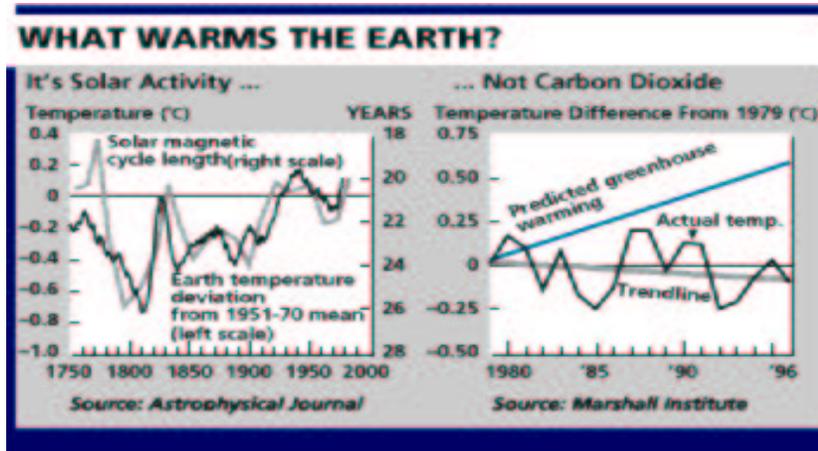


Figura 1. Artículo aparecido en el Wall Street Journal (4/12/1997).

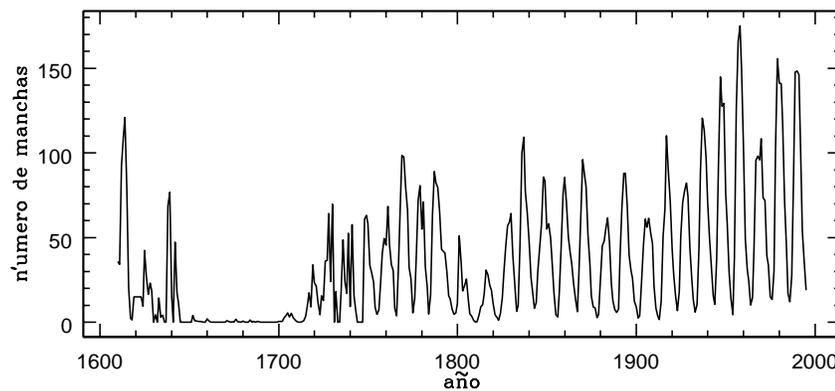


Figura 2. Media anual del número de manchas.

## 2. Evidencias cualitativas.

El registro más común de la actividad solar es el número de manchas, de las que se poseen observaciones en forma continuada desde que Galileo comenzó a estudiarlas con la invención del telescopio. En 1843 H. Schwabe descubrió que este número tiene un comportamiento quasicíclico, con un período promedio de 11 años (ver Fig. 2).

En la figura puede notarse que entre 1645 y 1715 existió un mínimo en la actividad solar muy prolongado e importante, el llamado mínimo de Maunder (Eddy 1976). Coincidentemente con este período, la Tierra atravesó lo que los climatólogos conocen con el nombre de “Pequeña Edad de Hielo”, durante la cual el clima terrestre fue inusualmente frío, lo que provocó enormes hambrunas en toda Europa.

Durante este período, por ejemplo, los canales de Holanda se congelaban en el invierno, lo que no sucede en la actualidad. El congelamiento del Támesis en el



Figura 3. *Izq.*: Paisaje invernal en Holanda (P. Brueghel 1601). *Der.*: A Frost Fair on the Thames (A. Hondius 1684).

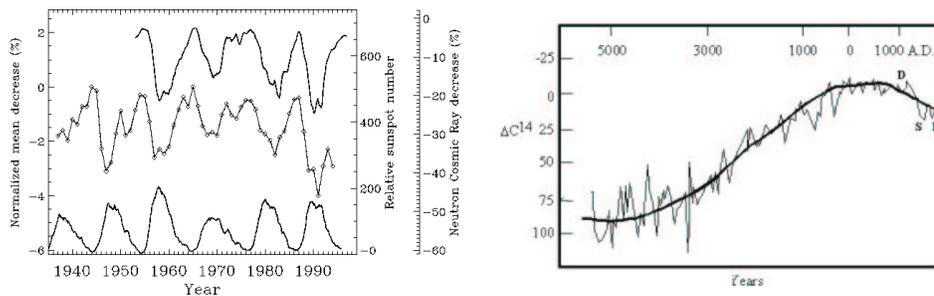


Figura 4. *Izq.*: Flujo de rayos cósmicos del monitor de neutrones de Climax (arriba), variación anual media del flujo de rayos cósmicos medido en cámaras de radiación (centro), y número de manchas solares (abajo). *Der.*: Variaciones en la concentración de  $^{14}\text{C}$  en anillos de árboles (línea delgada) y campo magnético terrestre (línea gruesa).

invierno de 1683-4 fue el más largo de la historia de Londres, y era habitual que se realizaran ferias en la superficie congelada del río (Figura 3).

Pero no se trató sólo de un fenómeno europeo, sino que afectó globalmente a la Tierra: en Nueva York, el puerto se congeló, y se podía caminar de Manhattan a Staten Island. Incluso en la Argentina existen evidencias de este fenómeno (ver Cioccale 1999).

Otra manera de estudiar la actividad solar, en tiempos más largos de los que permite el número de manchas, es a través de mediciones de la concentración de ciertos isótopos, tales como el  $^{14}\text{C}$  o el  $^{10}\text{Be}$ , producidos por el impacto de los rayos cósmicos galácticos en la alta atmósfera terrestre. Esta radiación cósmica está modulada por el campo magnético terrestre y por el interplanetario, que deflectan las partículas cargadas que la componen. Como el campo magnético interplanetario es mayor en períodos de mayor actividad solar, los rayos cósmicos están anticorrelacionados con la actividad, como se puede ver en la Figura 4.

Por lo tanto, las variaciones en la concentración de  $^{14}\text{C}$  se correlacionan con la actividad solar, aunque como el  $^{14}\text{C}$  tiene un tiempo de residencia en la atmósfera de 20 años, el ciclo solar aparece naturalmente filtrado. En la Figura 4 puede verse también la concentración de  $^{14}\text{C}$ , desde el año 5000 AC hasta la actualidad. La línea gruesa en esta figura marca la variación del campo magnético terrestre, y

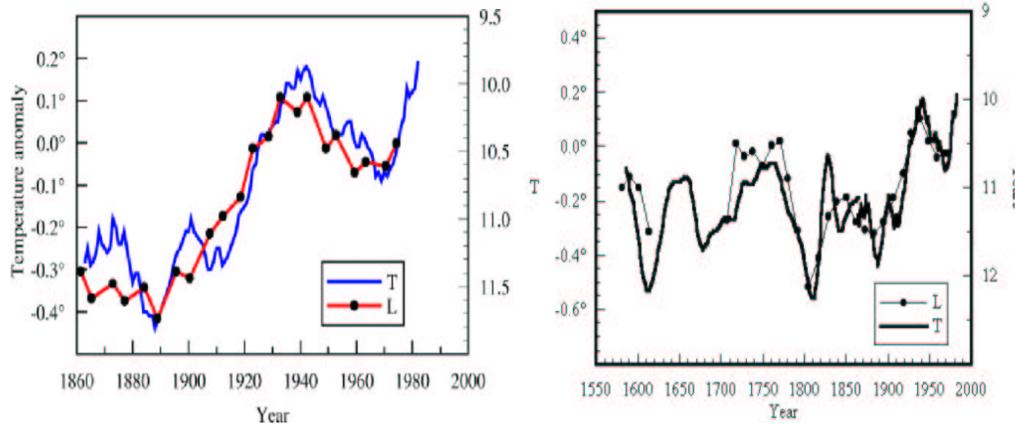


Figura 5. LCS suavizado y la media de 11 años de la temperatura terrestre en el hemisferio norte (*Izq*: Friis-Christensen y Lassen 1991, *Der*: Lassen y Friis-Christensen 1995).

superpuestas se pueden ver las variaciones debidas a la actividad solar. Con una M se indica el mínimo de Maunder, con una S el mínimo de Spörer, un período similar, y con una D puede verse un máximo en la actividad solar que coincide con un período inusualmente cálido en la tierra, conocido por los climatólogos como el “Óptimo Climático Medieval”.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que existen otros fenómenos que pueden modificar fuertemente el clima terrestre, en particular, las erupciones volcánicas, liberan aerosoles en la atmósfera que bloquean la luz solar. Por ejemplo, la erupción del Tambora en 1815, la más grande de la historia, produjo una masa de aerosoles de  $1.75 \times 10^{11}$  kg. La disminución de temperatura asociada sólo con esta erupción fue de  $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , y provocó el llamado “año sin verano”, 1816.

Mediciones en el hielo de Groenlandia indican que la pequeña edad de hielo, entre 1250 y 1700, se corresponde con un período de actividad volcánica muy intensa, y que el óptimo climático medieval coincide con un período de menor actividad volcánica. Esto lleva a que exista una escuela de climatólogos que consideran que el principal forzante externo del clima haya sido en ambos casos la actividad volcánica y no la solar. Sin embargo, como el tiempo de residencia de los aerosoles en la atmósfera es de sólo de unos meses, o a lo sumo uno o dos años, es difícil pensar que un período frío tan prolongado sea debido exclusivamente a la acción volcánica.

### 3. Longitud del ciclo solar

Uno de los trabajos más influyentes en este tema es el de Friis-Christensen y Lassen (1991). El núcleo de este trabajo puede verse en la Fig. 5, donde se grafican la longitud del ciclo solar (LCS) suavizada y la media de 11 años de la variación de la temperatura terrestre en el hemisferio norte. La longitud del ciclo solar está de alguna manera asociada con el nivel de actividad, y ciclos más cortos son en general más intensos (nótese que en la figura el eje de la LCS está invertido). Como puede verse, existe una gran similitud entre las formas de ambas curvas. Posteriormente, los mismos autores extendieron el estudio

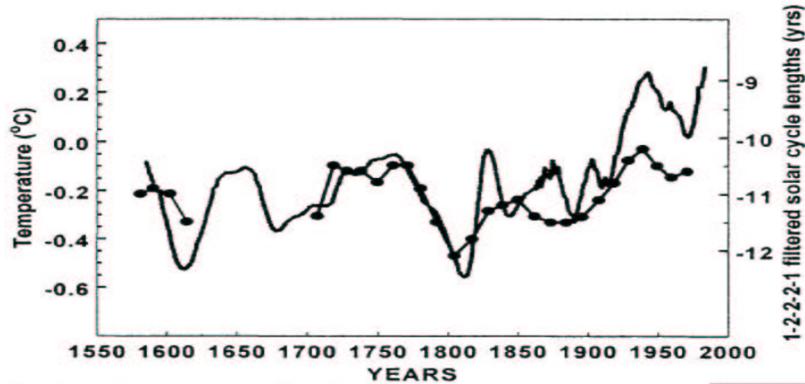


Figura 6. LCS suavizado y la media de 11 años de la temperatura terrestre en el hemisferio norte (Laut y Gunderman 2000).

para cubrir la evolución de la temperatura desde 1580 (Fig. 5, Lassen y Friis-Christensen 1995), con resultados similares.

Estos trabajos recibieron una gran atención de los medios, y son estos resultados los utilizados en el artículo del Wall Street Journal citado en §1. Como consecuencia de esta repercusión, la Agencia de Energía Danesa encargó a dos investigadores que analizaran estos resultados (Laut y Gundermann 2000; ver también Laut 2003).

Las conclusiones fueron que el acuerdo tan notable que se ve en la Fig. 5 (Izq.) fue obtenido utilizando valores no suavizados para los últimos 4 ciclos. De hecho, si se toman los valores correctos, ya disponibles una década más tarde, la LCS se mantiene en los valores de la década del 70, mientras que la temperatura continúa subiendo.

En la Fig. 5 (Der.), por otra parte, se muestran anomalías en la temperatura de dos trabajos distintos. Para las temperaturas medidas, entre 1851-1987, se utilizan los valores de Jones (1988) relativos a la media 1951-1970. Por otro lado, para el período 1579-1880 se utilizan valores reconstruidos a partir de distintos proxys por Groveman y Lansberg (1979), relativos a la media 1881-1975. Pero ambas medias tienen una diferencia de 0.1 °C, como puede verse si se inspecciona cuidadosamente la Fig. 5 (Der.).

Por otra parte, para mejorar la sensación de acuerdo, Lassen y Friis-Christensen (1995) ajustaron las curvas de LCS y temperatura en el siglo XX, aunque puede verse que en años anteriores los valores de LCS están por encima de los de la temperatura. Si se renormalizan ambas series de temperatura, y se ajusta la curva de LCS a la temperatura anterior a 1850, período en el que seguramente no hubo ninguna influencia humana, se obtiene la Fig. 6 (Laut y Gundermann 2000), donde puede verse claramente que la temperatura en la segunda mitad del siglo XX crece muy por encima del LCS.

Los mismos autores (Laut y Gunderman 1998), utilizaron los mismos valores para combinar la influencia de origen humano y solar. En el panel izquierdo de la Fig. 7 se muestra el calentamiento de origen humano calculado para dos valores del parámetro  $\Delta T_{2X}$ , que representa el aumento de temperatura esperado si la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se duplica. Este parámetro, según los especialistas en cambio global, estaría entre 1.5 y 4.5 °C, y el valor aceptado

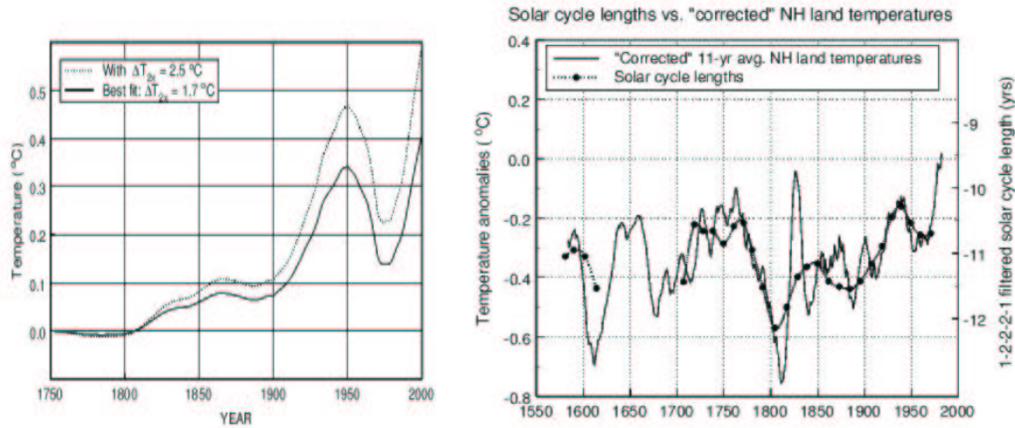


Figura 7. *Izq*: Calentamiento de origen humano calculado. *Der*: LCS suavizado y la media de 11 años de la temperatura terrestre “coi-regida” (Laut y Gunderman 1998).

generalmente es de  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los autores “corrigieron” la temperatura descontando el efecto humano para  $\Delta T_{2X} = 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y encontraron un acuerdo mucho mejor con la LCS, que se muestra en el panel derecho de la Fig. 7. Por lo tanto, los autores consideran que los datos son compatibles con un calentamiento de origen humano, con un valor de  $\Delta T_{2X} = 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , combinado con una influencia solar que explicaría las oscilaciones menores.

A conclusiones similares llegan distintos trabajos de modelado de clima. Por ejemplo, Wigley et al (1997) utilizaron un modelo de clima para estudiar la respuesta del clima terrestre a distintos efectos, y encontraron que la inclusión de la influencia de la actividad solar mejora el acuerdo. En sus propias palabras: “Los cambios de temperatura observados son consistentes con una influencia humana dominante y una influencia secundaria de los incrementos en la irradiancia solar” (ver Fig. 8).

#### 4. Variaciones en la irradiancia solar

Estos trabajos, sin embargo, sólo mostraron correlaciones entre la actividad solar y la temperatura en la tierra. Pero la existencia de una correlación entre dos fenómenos no implica causalidad, y es necesario proponer un mecanismo concreto para explicar cómo las variaciones en la actividad solar podrían afectar la tierra. Dado que el Sol es responsable por la abrumadora mayoría de la energía de la tierra, el candidato principal sería la variación de la irradiancia solar.

En la Fig. 9 se muestran mediciones de la irradiancia solar total (IST) a lo largo de dos ciclos solares. Como puede verse, las variaciones son del orden del 0,1%, lo que es insuficiente para explicar el calentamiento observado en los últimos 120 años. En el panel derecho de la misma figura se muestra la variación porcentual de la irradiancia, en función de la longitud de onda. Puede verse que en el extremo UV del espectro la variación es mucho mayor que en la irradiancia integrada. Sin embargo, la radiación ultravioleta no penetra en la atmósfera, por lo que un mecanismo basado en las variaciones de la irradiancia UV debe explicar cómo esta radiación puede afectar las capas inferiores.

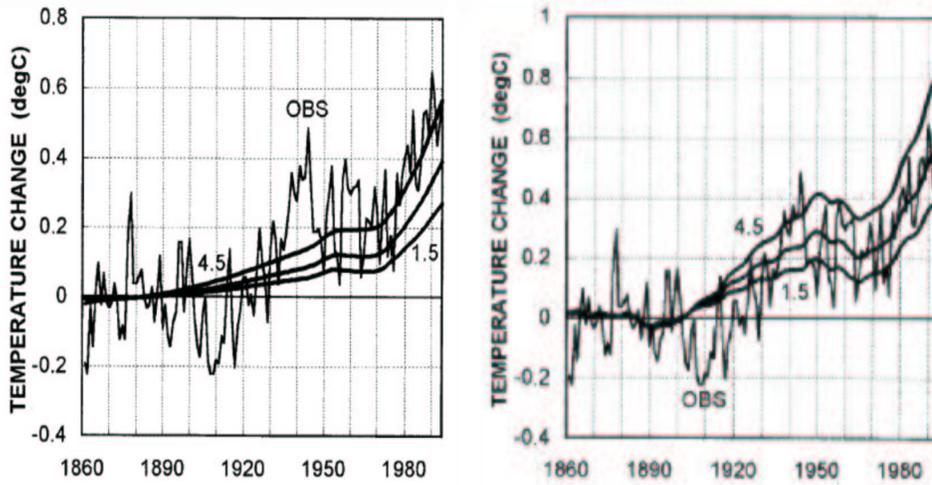


Figura 8. *Izq*: Temperaturas observadas y modeladas con sólo la influencia humana. *Der*: Temperaturas observadas y modeladas con la influencia humana y solar (Wigley et al. 1997).

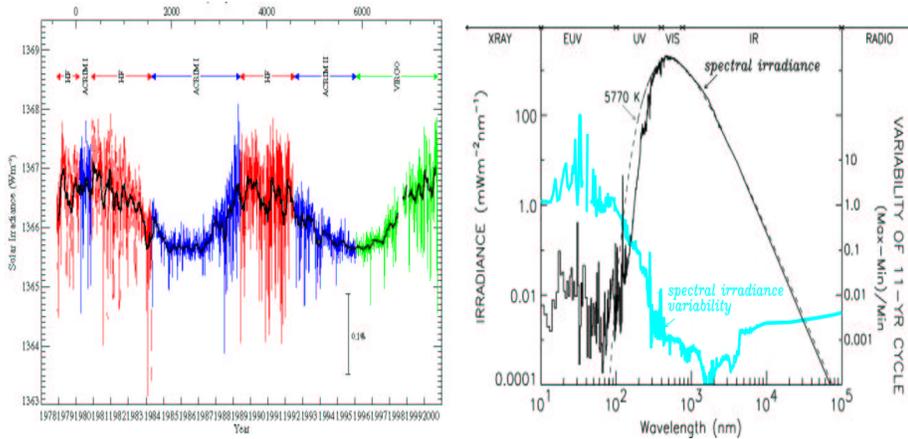


Figura 9. *Izq*: Variaciones de la Irradiancia solar total (IST) con el ciclo solar (Frölich 2000). *Der*: Irradiancia espectral (negro), ajuste de cuerpo negro (puntos), y variación relativa durante el ciclo (azul) (Lean 2002)

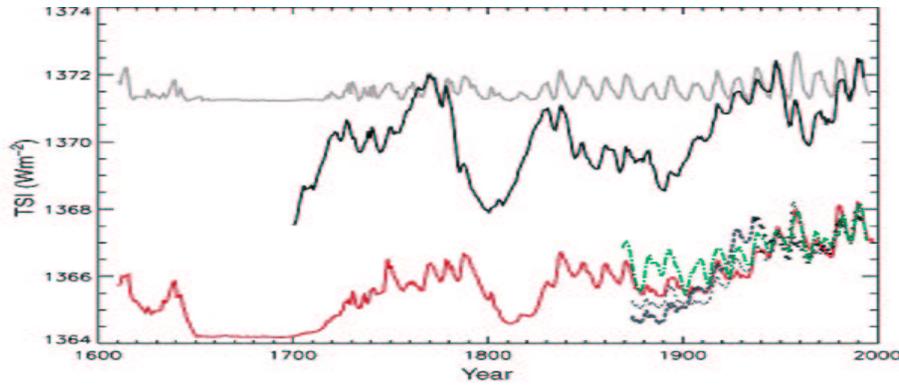


Figura 10. Reconstrucciones de IST según Lean et al. (1995, rojo), Hoyt y Schatten (1993, negro), Solanki y Fligge (1998, azul), y Lockwood y Stamper (1999, verde); junto con el número de grupos de manchas (Hoyt y Schatten, 1998, gris), a escala.

Por otro lado, si bien las variaciones de la IST con el ciclo solar son demasiado pequeñas como para explicar el calentamiento global, es posible que en períodos mayores estas variaciones también sean mayores. Un cierto número de trabajos realizaron reconstrucciones históricas de la IST basándose en distintos indicadores de actividad solar, tales como el número de manchas, la longitud del ciclo solar, la relación entre la umbra y la penumbra de las manchas solares, etc. (ver Fig. 10). Todas estas reconstrucciones tiene en común que además de las variaciones del indicador o los indicadores elegidos, agregan una tendencia secular, estimada o de la variación de irradiancia necesaria para explicar el calentamiento global (de un 0.6% desde el Mínimo de Maunder hasta ahora), o a partir de datos estelares.

## 5. Radiación cósmica y cobertura de nubes

Friis-Christensen y Svensmark (1997, ver también Svensmark 1998) encontraron que la cobertura de nubes (CN) total, medida por 3 sistemas satelitales distintos, variaría en fase con el flujo de la radiación cósmica (FRC) que recibe la tierra, el cuál, como explicamos en §2, está modulado por el ciclo solar.

Con la actualización de los datos, esta correlación se perdió unos años después, aunque se mantuvo la correlación entre el FRC y la CN bajas, por debajo de 680 hPa (Palle Bagó y Butler 2000, Marsh y Svensmark 2000; ver Fig. 11). Un estudio de Lockwood et al. (1999) encontró que el flujo magnético solar total, derivado del índice geomagnético aa, se incrementó en un 40% desde 1964 y en un factor 2.3 desde 1901. Esto debería producir una reducción notable en el FRC a lo largo del siglo XX, que estaría acompañada de una reducción en la cobertura de nubes, una reducción en el albedo terrestre, y un aumento en la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, lo que podría producir el calentamiento observado. Cabe señalar, por otra parte, que los resultados de Lockwood et al (1999) son contrarios, al menos parcialmente, a los obtenidos

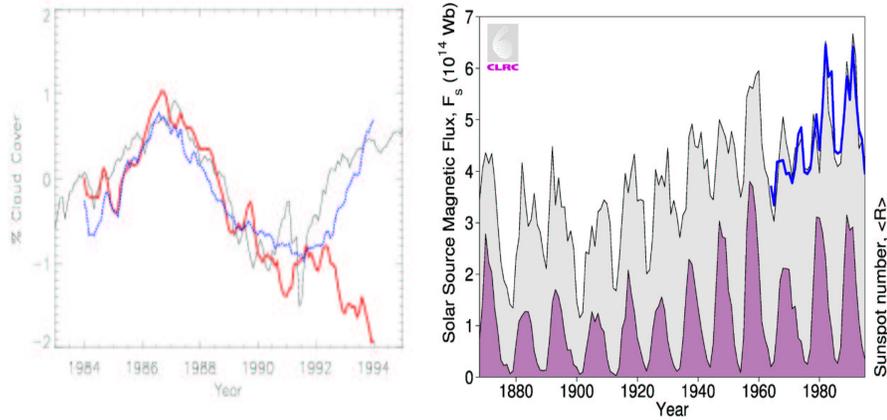


Figura 11. *Izq*: Cobertura de nubes total (rojo) y baja (azul), y el flujo de rayos cósmicos de Climax (negro) (Palle Bagó y Butler 2000). *Der*: Flujo magnético solar total, derivado del índice geomagnético aa (sombreado gris) y de observaciones interplanetarias (azul), y el número de manchas (sombreado púrpura) (Lockwood et al. 1999).

por Arge et al (2002) que no observaron ninguna variación significativa en el flujo solar desde 1976.

Los trabajos de Svensmark y colaboradores fueron criticados tanto desde un punto de vista metodológico (ver, por ejemplo, Laut 2003), como físicos. Por ejemplo, es importante notar que las observaciones satelitales pueden ver las nubes bajas en las regiones en las que no hay nubes superiores. Por lo tanto, la CN bajas es la que está sujeta a mayores errores, e incluso un aumento en la CN altas puede ser interpretado como una disminución en las nubes bajas y viceversa.

Por otra parte, los rayos cósmicos son absorbidos en la parte superior de la atmósfera, por lo que de haber una influencia en la formación de nubes debería observarse en las de mayor altura. Además, como los rayos cósmicos son “guiados” por el campo magnético terrestre, la mayoría ingresa en la atmósfera a altas latitudes (dando lugar a las auroras boreales). Pero la correlación notada por Svensmark es mayor a latitudes medias (ver Fig. 12).

Por otra parte, Udelhofen y Cess (2001) estudiaron observaciones realizadas desde tierra en más de 90 estaciones meteorológicas de los Estados Unidos durante casi 90 años (1900-1987), y encontraron una correlación muy alta con el número de manchas (y no con el FRC). Pero, más importante, esta correlación tiene signo opuesto a la de Svensmark: durante períodos de mayor actividad, la cobertura de nubes sería mayor (Fig. 13). Udelhofen y Cess (2001) sugieren que las variaciones de la cobertura de nubes son un resultado de cambios en la circulación, provenientes de variaciones en el calentamiento estratosférico causadas por la absorción de la radiación solar por el ozono.

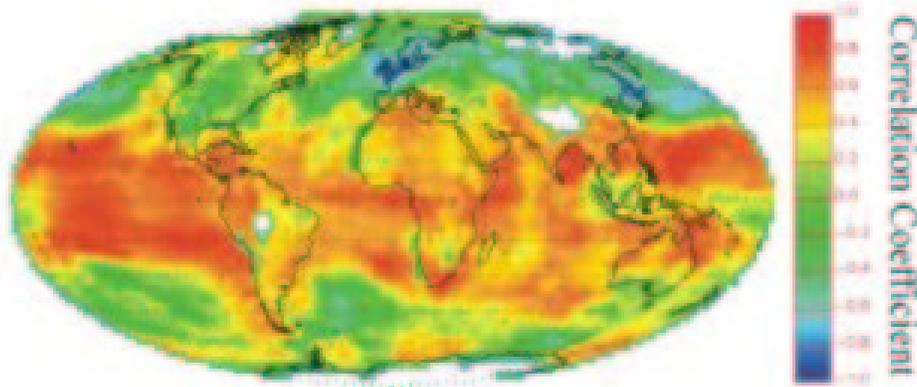


Figura 12. Correlación entre flujo de rayos cósmicos y temperatura en la capa superior de las nubes (Marsh y Svensmark 2000).

## 6. Conclusiones (por ahora)

Aunque existen evidencias de la influencia que la cambiante actividad solar tiene en el clima en la tierra, parece dudoso que esta sea la causa principal del calentamiento global. En particular, se sabe que las variaciones de actividad influyen sobre la densidad del ozono estratosférico, sobre las temperaturas de la termosfera ( $\sim 50$  K a 120 km,  $\sim 200$  K a 400 km de altura) y sobre los patrones de circulación de vientos, pero no existe ningún mecanismo aceptado para explicar una correlación con la temperatura en la superficie de la tierra.

Por lo tanto, lo más probable es que el calentamiento global observado en el último siglo se deba a ambas causas: la actividad solar y la actividad humana. Lo que está en discusión fundamentalmente son los porcentajes. En general, las opiniones al respecto dependen fuertemente del sesgo profesional del investigador, y los científicos solares le dan una importancia mucho mayor al Sol que los expertos en clima.

Este sesgo profesional es entendible, dado que para un investigador científico, de cualquier área del conocimiento, es importante resaltar la importancia de sus estudios para la Humanidad, ante sus colegas, ante la opinión pública y, particularmente, ante los organismos que financian la investigación. Sin embargo, dada la importancia política del tema, uno debería ser especialmente cuidadoso antes de extraer conclusiones apresuradas del hecho de que dos curvas tienen alguna similitud.

## Referencias

- Arge, C. N., Hildner, E., Pizzo, V. J., & Harvey, J. W., 2002, *JGR* 107, 1319  
 Cioccale, M. 1999, *Quat. International* 62, 35.  
 Eddy, J. A. 1976, *Science* 192, 1189.

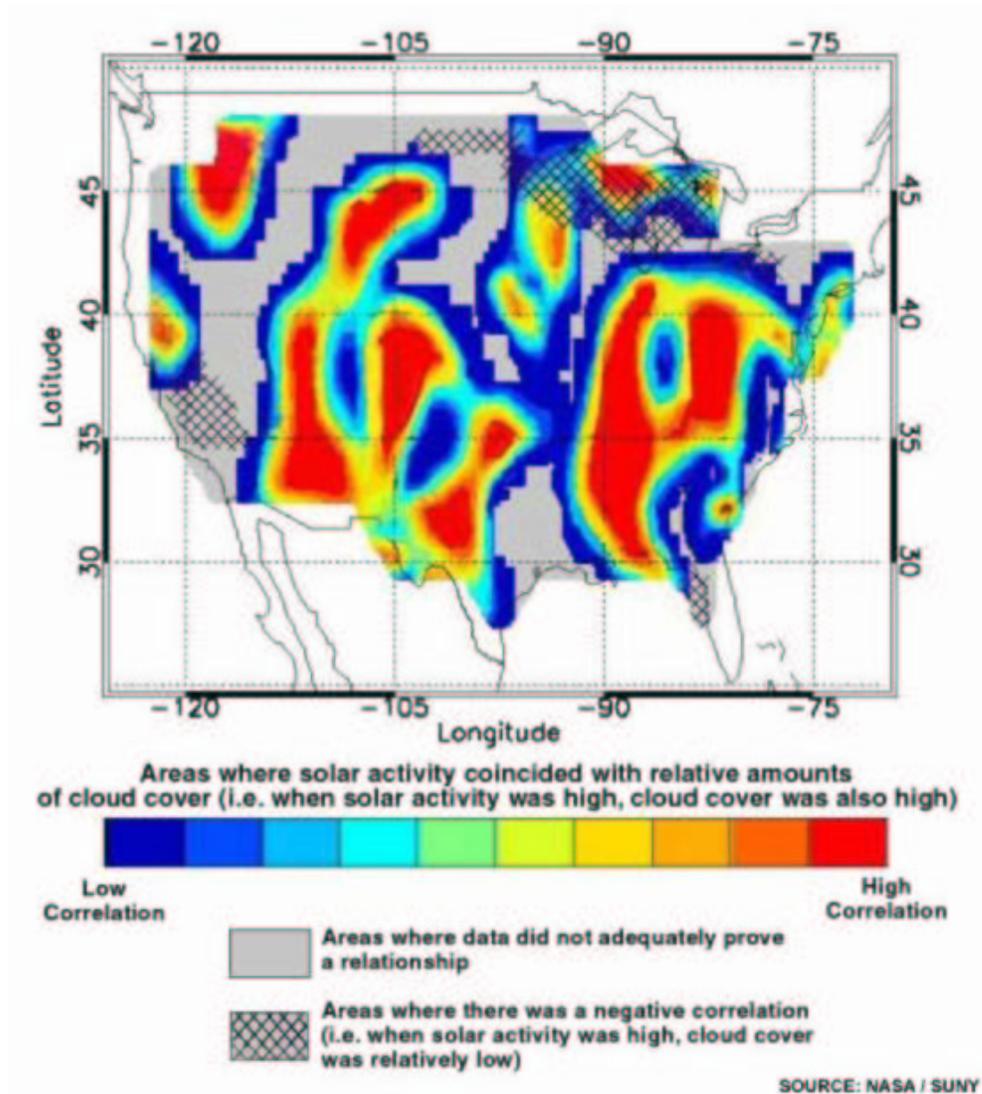


Figura 13. Correlación entre cobertura de nubes y el número de manchas (Udelhofen y Cess 2001).

- Friis-Christensen, E., & Lassen, K. 1991, *Science* 254, 698.
- Friis-Christensen, E., & Svensmark, H. 1997, *Ad.Spa. Res* 20, 913
- Frölich, C. 2000, *Spa. Sci. Rev.* 94, 15
- Groveman, B. S., & Lansberg, H. E. 1979, *GRL* 6, 767
- Hoyt, D.V., & Schatten, K. H. 1993, *JGR* 98, 18895
- Hoyt, D.V., & Schatten, K. H. 1998, *Sol. Phys.* 179, 189
- Hoyt, D.V., & Schatten, K. H. 1997, *The Role of the Sun in Climate Change*,  
New York: Oxford University Press.
- Jones, P. D. 1988, *J. Clim.* 1, 654
- Laut, P. 2003, *JASTP* 65, 801
- Laut, P., & Gunderman, J. 1998, *JASTP* 60, 1719
- Laut, P., & Gunderman, J. 2000, en *SOLSPA I*, ESA-SP 463, p. 189.
- Lassen, K., & Friis-Christensen, E. 1995, *JATP* 57, 835.
- Lean, J. 2002, [www.ency-astro.com](http://www.ency-astro.com)
- Lean, J., Beer, J., & Bradley, R. 1995, *GRL* 22, 3195
- Lockwood, M., & Stamper, R. 1999, *GRL* 26, 2461
- Lockwood, M., Stamper, R., & Wild, M. N. 1999, *Nature*, 399, 437-439
- Marsh, N.D., & Svensmark, H. 2000, *Phys. Rev. Lett.* 85, 5004
- Palle Bagó, E., & Butler, C. J. 2000, *Astron. Geophys.* 41, 18
- Robinson, A. B., Baliunas, S., Soon, W., & Robinson, Z. W. 1998,  
<http://www.oism.org/pproject/s33p36.htm>
- Solanki, S. K., & Fligge, M. 1998, *GRL* 25, 341
- Svensmark, H. 1998, *Phys. Rev. Let.* 81, 5027
- Udelhofen, P., & Cess, R. 2001, 28, 2617
- Wigley, T., Jones, P., & Raper, S. 1997, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 94, 8314